(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

UO‘K: 621.31 10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.13

ELEKTR YOYLI PECHLARDA GENETIK ALGORITM ASOSIDA OPTIMAL TIRISTOR BOSHQARUVI

Raxmonov Ikromjon Usmonovich
T.f.d., prof, Elektr ta’minoti kafedrasi mudiri, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston
E-mail: ilider1987@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0003-2076-5919

Xolixmatov Baxriddin Berdi o‘g‘li
Elektr ta’minoti kafedrasi assistenti, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston
E-mail: xolixmatov.b22@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-6954-1145

Annotatsiya. *Ushbu maqolada elektr yoyli pechlar ishlash jarayonida elektr energiyasi sifatiga salbiy ta’sirlari va kuchlanish nosimmetriyasi hamda reaktiv quvvat oqimi tahlil qilinadi. Pechlar ish faoliyatidagi uzluksizlik va yuqori haroratni ushlab turish ehtiyoji elektr energiyasining barqaror va sifatli bo‘lishini talab qiladi. Shu sababli, tadqiqotning asosiy maqsadi – tiristorli boshqaruv tizimida tiristorlarning ochilish burchagini optimal tanlash orqali elektr energiyasi sifatini oshirish va texnologik jarayon samaradorligini ta’minlashdir. Bunda ochilish burchagi nofaol fazalardagi reaktiv quvvat kompensatsiyasiga ta’sir etuvchi boshqaruv parametr sifatida olinadi va genetik algoritm (GA) yordamida optimallashtiriladi. Modelda obyektiv funksiya sifatida reaktiv quvvat oqimi, kuchlanish nosimmetriyasi mezonlari qabul qilingan. Natijalarda optimal burchak tanlanganda tizimning elektr energiya sifati ko‘rsatkichlari sezilarli darajada yaxshilangani va kuchlanish nosimmetriyasi kamayganligi ko‘rsatildi.*

Kalit so‘zlar: *elektr yoyli pech, tiristor ochilish burchagi, elektr energiyasi sifati, genetik algoritm, kuchlanish nosimmetriyasi, reaktiv quvvat, optimal boshqaruv, texnologik jarayon barqarorligi.*

ОПТИМАЛЬНОЕ ТИРИСТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Рахмонов Икромжон Усманович
д.т.н., проф., заведующий кафедрой электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан

Холихматов Бахриддин Берди угли
Ассистента кафедры электроснабжения Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. *В данной статье рассматриваются негативные воздействия на качество электроэнергии в процессе работы электродуговых печей, а также анализируются несимметрия напряжения и потоки реактивной мощности. Необходимость обеспечения непрерывной работы печей и поддержания высоких температур предъявляет высокие требования к стабильности и качеству электроснабжения. В связи с этим основная цель исследования заключается в повышении качества электроэнергии и обеспечении эффективности технологического процесса за счёт оптимального выбора угла открытия тиристоров в системе тиристорного управления. При этом угол открытия используется в качестве управляющего параметра, влияющего на компенсацию реактивной мощности в нерабочих фазах, и оптимизируется с помощью генетического алгоритма (ГА). В предложенной модели в качестве целевой функции приняты критерии потоков реактивной мощности и несимметрии напряжения. Результаты показывают, что при выборе оптимального угла открытия значительно улучшаются показате-*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

ли качества электроэнергии системы, а также существенно снижается уровень несимметрии напряжения.
Ключевые слова: *электродуговая печь, угол открытия тиристора, качество электроэнергии, генетический алгоритм, несимметрия напряжения, реактивная мощность, оптимальное управление, стабильность технологического процесса.*

OPTIMAL THYRISTOR CONTROL BASED ON GENETIC ALGORITHM IN ELECTRIC ARC FURNACES

Rakhmonov Ikromjon Usmanovich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electricity Supply, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

Kholikhmatov Bakhiddin Berdi ugli
Assistant of the Department of Electricity Supply, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *This article examines the negative impacts on power quality during the operation of electric arc furnaces, with a particular focus on voltage asymmetry and reactive power flows. The need to ensure continuous furnace operation and maintain high temperatures imposes stringent requirements on the stability and quality of power supply. Accordingly, the primary goal of this study is to improve power quality and enhance the efficiency of the technological process by optimally selecting the thyristor firing angle in a thyristor-based control system. In this context, the firing angle is used as a control parameter influencing the compensation of reactive power in non-working phases, and is optimized using a genetic algorithm (GA). In the proposed model, the objective function incorporates criteria related to reactive power flows and voltage asymmetry. The results demonstrate that selecting an optimal firing angle significantly improves the system's power quality indicators and substantially reduces voltage asymmetry.*
Keywords: *electric arc furnace, thyristor firing angle, power quality, genetic algorithm, voltage asymmetry, reactive power, optimal control, stability of the technological process.*

Kirish. Elektr yoyli pechlar (EYP) metallurgiya sanoatida keng qo‘llaniladigan yuqori quvvatli qurilmalardan bo‘lib, ular intensiv elektr energiyasi iste’moli orqali metall eritish vazifasini bajaradi. Ularning ish rejimi yuklamaning yuqori o‘zgaruvchanligi, impulslilik va notekis fazaviy taqsimoti bilan ajralib turadi. Aynan mana shu fazalar bo‘yicha yuklamaning notekisligi sababli elektr ta’minot tizimida kuchlanish nosimmetriyasi, nolinchi tok oqimi, umumiy garmonik buzilish kabilar paydo bo‘ladi. Bu esa faqat elektr energiyasi tizimiga emas, balki pechning o‘z ish faoliyatiga ham salbiy ta’sir ko‘rsatadi – texnologik jarayon uzluksizligi buziladi, solishtirma energiya sarfi ortadi va uskunalarning ishonchliligi pasayadi.

Ushbu muammoni bartaraf etish uchun tizimda fazalardagi yuklamani balanslashtirish, ya’ni har bir fazadagi reaktiv quvvat oqimini boshqarish zarur. Shu maqsadda tiristorli bosh-qaruvga ega kompensatsiya tizimlari qo‘llaniladi. Tiristor orqali har bir fazaga kondensatorni faqat kerak bo‘lgan vaqtda ulanadigan qilib sozlash orqali fazalardagi reaktiv quvvatni tenglashtirish, ya’ni kuchlanish nosimmetriyasini kamaytirish mumkin bo‘ladi.

Biroq real sharoitda yuklama tez-tez va noma’lum tarzda o‘zgarib turadi. Shuning uchun tiristorlarning ochilish burchagini avtomatik tarzda va doimiy ravishda optimal holatda ushlab turish talab etiladi. Ushbu tadqiqotda aynan shu boshqaruv muammosiga yechim sifatida genetik algoritm (GA) taklif etiladi. GA yordamida ochilish burchagi tanlanadi va bu orqali kuchlanish nosimmetriyasi, reaktiv quvvat farqi va THD kabi energiya sifatini aniqlovchi mezonlar minimallashtiriladi. Taklif etilgan yondashuv natijasida EYP ishlash bar-qarorligi, energiya samaradorligi va elektr tar-moq sifati oshishi kutilmoqda. Tizimga real vaqtli avtomatik boshqaruv imkoniyatini qo‘shish orqali texnologik jarayonlar uzluksizligini ta’min-lash mumkin bo‘ladi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. EYP sanoat elektr tarmoqlarida kuchlanish sifati bilan bog‘liq muammolar, xususan kuchlanish nosimmetriyasi,

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

reaktiv quvvat muvozanatsizligi va yuqori garmonikalarni keltirib chiqaradi. Buning sababi – uch fazali yuklamaning o‘zgaruvchan va nomutanosib xarakterga ega bo‘lishidir. Aynan shu muammo tarmoqda kuchlanishning simmetrik bo‘lmagan shaklda tarqalishiga olib keladi.

Grünbaum va Pernoto‘z ishlarida SVC va STATCOM qurilmalarini EYP lar tomonidan chaqirilgan nosimmetriklik va kuchlanish silkinishlarini bartaraf etishda samarali deb topishgan. Ayniqsa STATCOM qurilmasi tezkor javob berish imkoniyati orqali kuchlanishni real vaqt rejimida muvozanatga keltirishda yuqori natijalarni bergan. Ularning natijalariga ko‘ra, tarmoq sifati 35–40% ga yaxshilangan [1].

Shunga o‘xshash tarzda Yazdani va boshqalar tomonidan taklif etilgan STATCOM uchun nolinear nazorat strategiyasi kuchlanishning RMS qiymatidagi tebranishlarni kamaytirgan. Simulyatsiya natijalari asosida, kuchlanish nosimmetriyasini barqarorlashtirishda STATCOM qurilmasi sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatgani tasdiqlangan [2].

Kashani va Babaei o‘z izlanishlarida EYP samaradorligini oshirishda SVC va STATCOM qurilmalarining qo‘llanishini amaliy jihatdan asoslashgan. Ular kuchlanish nosimmetriyasini 27% gacha kamaytirganlarini tajriba natijalari bilan ko‘rsatishgan [3].

D-STATCOM qurilmasining qo‘llanilishi ham ilmiy adabiyotlarda keng o‘rganilgan. Masalan, Alzate va Escobar elektr yoyli pechlardan kelib chiqadigan kuchlanish nosimmetriyasi, nolinchi tok va garmonikalarni D-STATCOM orqali kamaytirish mumkinligini ko‘rsatgan. Ularning natijalari RMS kuchlanish o‘zgarishini 18% dan 4.7% gacha kamaytirgan [4].

Shunday qilib, adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, EYP larda kuchlanish nosimmetriyasini kamaytirish bo‘yicha turli qurilmalar (STATCOM, SVC, D-STATCOM) va yondashuvlar (fuzzy logic) ishlatilgan. Lekin ularning ko‘pchiligi doimiy yoki yarim-moslashuvchan sharoitlar uchun mo‘ljallangan. Elektr tizimining real vaqtli, keskin o‘zgaruvchan yuk sharoitlarida maksimal barqarorlikni ta’minlash uchun tiristor ochilish burchagini GA orqali optimallashtirish – dolzarb va yuqori aniqlikdagi yechim hisoblanadi.

Metodologiya. Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi – elektr yoyli pech tizimida yuzaga keladigan kuchlanish nosimmetriyasini kamaytirish orqali elektr energiyasining sifatini oshirish va tizimning energetik samaradorligini yaxshilashdan iborat. Buning uchun har bir ishchi bo‘lmagan fazaga kondensatorlar ulangani holda, ularning ulanishi tiristorlar orqali boshqariladi. Tiristorlarning ochilish burchagini optimal tanlash esa GA asosida amalga oshiriladi.

EYP zamonaviy metallurgik ishlab chiqarish tizimlarining ajralmas qismi bo‘lib, ular kuchli o‘zgaruvchan uch fazali yuklama sifatida ishlaydi. Ushbu pechlar fazalar bo‘yicha tok va kuchlanishlarning nomutanosib taqsimlanishiga sabab bo‘ladi. Bu, o‘z navbatida, elektr tarmog‘ida kuchlanish nosimmetriyasini yuzaga keltiradi. EYP tizimida bu nosimmetriya quyidagi sabablarga asoslanadi: har bir fazadagi tokning qiymati va yo‘nalishi vaqt davomida keskin o‘zgarib turadi; ishlov berilayotgan metallning elektr o‘tkazuvchanligi, harorati va fizik xossalari fazalar bo‘yicha farqlanadi; elektromagnit induktsiyaning notekisligi esa magnit maydonlarni fazaviy nomutanosib holatga keltiradi. Bu sharoitlarda pechlar “nolinchi sistemasiz yuklama” sifatida namoyon bo‘ladi va fazalar bo‘yicha reaktiv quvvat oqimi keskin farq qiladi. Bunday tizimdagi kuchlanish nosimmetriyasi to‘g‘ri, teskari va nol ketma-ketlik tashkil etuvchilari asosida aniqlanadi:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{3}\cdot(U_A + a\cdot U_B + a^2\cdot U_c) \\ U_2 = \frac{1}{3}\cdot(U_A + a^2\cdot U_B + a\cdot U_C) \\ U_0 = \frac{1}{3}\cdot(U_A + U_B + U_C) \end{cases} \quad (1)$$

$$k_{U2} = \frac{U_2}{U_1}\cdot 100\% \text{ va } k_{U0} = \frac{U_0}{U_1}\cdot 100\% \quad (2)$$

Agar usbu koeffitsient qiymati 2-4% dan oshsa, bu elektr energiyasi sifatining sezilarli pasayganini bildiradi. Ushbu nosimmetriyani bartaraf etish uchun tadqiqot doirasida har bir ishchi bo‘lmagan fazaga kondensatorlar ulangani holda, ularning ulanishi tiristorlar orqali tartiblanadigan boshqaruv qurilmasi taklif etiladi. Har bir tiristorning ochilish burchagi α orqali fazadagi reaktiv quvvat taqsimoti boshqariladi. Kondensator quvvati va tiristorning ochilish burchagi orasidagi bog‘liqlik quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$Q_L = \frac{U^2}{\omega\cdot L}\cdot\left[\frac{2}{\pi}\cdot\left((\pi-\alpha)\cdot(2+cos2\alpha)+\frac{3}{2}\cdot sin2\alpha\right)\right] \quad (3)$$

Yuqorida bayon etilgan usul orqali EYP

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

tizimidagi kuchlanish nosimmetriyasi fazaviy reaktiv quvvat muvozanatini boshqarish orqali kamaytiriladi. Buning uchun har bir fazaga ulanadigan kondensatorlar tiristorlar yordamida individual tarzda boshqariladi. Tiristorlarning ochilish burchagi fazadagi yuk holatiga mos tanlanib, kerakli miqdordagi kompensatsiya ta'minlanadi. Ushbu burchaklar genetik algoritm asosida optimallashtiriladi va elektr energiya sifati ko'rsatkichlarini yaxshilashga xizmat qiladi.

Natijalar. Elektr yoyli pech (ДСП-30) da metallni eritish jarayoni davomida ishchi fazadagi yuklanish va shuningdek, fazalar bo'yicha kuchlanishlar keskin dinamik o'zgarishga uchraydi. Jarayonning o'zgaruvchan tabiati sababli har bir vaqt momentida ishchi faza o'zgaradi, hamda unga mos ravishda reaktiv quvvat sarfi va kuchlanishlar farqi vujudga keladi. Aynan ushbu jarayonni fazalararo kuchlanish nosimmetriyasini kamaytirish va energiya sifatini yaxshilash maqsadida boshqarish talab etiladi. Buning uchun GA algoritm orqali optimal ochilish burchaklari tanlanadi.

Jarayonning real fizik xususiyatlarini modellashtirish uchun quyidagi bosqichlar asosida ish olib borildi:

- ishchi faza real vaqt davomida o'zgaradi (fazalar A, B, C bo'ylab siklik ravishda almashadi).
- har bir vaqt momentida ishchi fazadagi reaktiv quvvat sanoat amaliyotiga mos tarzda belgilanadi.
- qolgan fazalardagi kuchlanishlar nosimmetrik tarzda shakllanadi, bu esa ularni tenglashtirish uchun kompensatsion reaktiv quvvatni kiritishni talab etadi.

Quyidagi jadvalda eritish jarayonining ma'lum vaqtlaridagi ishchi faza reaktiv quvvati va barcha fazalardagi kuchlanishlar keltirilgan. Ushbu ma'lumotlar keyingi bosqichda GA algoritmga kirish ma'lumotlari sifatida ishlatiladi.

1-jadvalda keltirilgan ishchi fazadagi reaktiv quvvat va fazalardagi kuchlanishlar asosida keyingi bosqichda har bir vaqt momentida qolgan fazalarga qanday kompensatsion reaktiv quvvat kiritish kerakligi hisoblab chiqildi.

Eritish jarayonining fizik xususiyatidan kelib chiqib, ishchi faza va uning kuchlanish qiymati jarayon davomida dinamik tarzda o'zgaradi. Shuning uchun bu kuchlanish qat'iy etalon sifatida olinmaydi, balki har bir optimallashtirish siklida real vaqtda o'lchanadi va shu o'lchangan qiymatga asoslangan holda kompensatsiya hisoblanadi.

1-jadval

Reaktiv quvvat va kuchlanish o'zgarishi

Vaqt, min	Ishchi faza	$Q_{sh.f}$	U_A, V	U_B, V	U_C, V
1	A	6000	320	410	425
5	B	5800	400	340	420
10	C	5500	410	400	330
15	A	5000	315	405	420
20	B	4700	395	335	415
25	C	4500	405	390	325
30	A	4200	310	400	410
35	B	4000	390	330	405
40	C	3700	400	395	335
45	A	3400	305	395	405

Ya'ni, har bir vaqt momentida ishchi fazadagi hozirgi kuchlanish qiymati U_{ish} tizim uchun joriy maqsadli kuchlanish nuqtasi sifatida ishlatiladi. Qolgan har bir fazadagi kuchlanish U_i (i = A, B, C) o'lchanadi va quyidagi tarzda har bir faza uchun kuchlanish farqi aniqlanadi:

$$\Delta U_i(t) = U_{ish}(t) - U_i(t) \quad (4)$$

Har bir fazaning kuchlanish farqiga asoslangan holda kerakli kompensatsion reaktiv quvvat quyidagicha hisoblanadi:

$$Q_{kom,i}(t) = \Delta U_i(t) \cdot I_{nom} \quad (5)$$

Bu yerda: $U_{ish}(t)$ – hozirgi vaqt momentida ishchi fazadagi kuchlanish; $U_i(t)$ – hozirgi vaqt momentida qolgan fazadagi kuchlanish; I_{nom} – fazaviy nominal tok.

Hisoblangan kompensatsion reaktiv quvvatlar keyingi bosqichda GA algoritmga kirish ma'lumotlari sifatida beriladi. GA esa ushbu qiymatlarga mos ravishda tiristor ochilish burchaklarini optimal tarzda aniqlaydi va natijada tizimga kerakli reaktiv quvvat yetkaziladi. Shu orqali GA algoritmning real vaqt boshqaruvdagi samaradorligi va energiya sifatini yaxshilashga qo'shgan hissasi baholanadi.

GA algoritmi ishlashida tiristorlar uchun ochilish burchaklari quyidagi oraliqda belgilandi:

$$\alpha_i \in [0^o, 90^o] \ (i = A, B, C) \quad (6)$$

Bu cheklov sanoatdagi tiristor boshqaruv tizimining texnologik imkoniyatlariga mos ravishda tanlangan bo'lib, burchakning 0° qiymatida maksimal reaktiv quvvat hosil qilinadi, 90° da esa reaktiv quvvat nolga yaqinlashadi.

GA yondashuvining asosiy ustunligi shundaki, u murakkab, nochiziqli va o'zgaruvchan

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

jarayonlar uchun samarali optimallashtirish imkonini beradi [5]. Elektr yoyli pechda esa kuchlanish va reaktiv quvvatlarning bog‘lanishi va o‘zgarishi yuqoridagi xususiyatlarga ega. GA algoritmda optimallashtirish jarayonining muvaffaqiyatli bajarilishi uchun mos fitness funksiyani tanlash juda muhim ahamiyatga ega. Ushbu ishda tiristorlar orqali boshqariladigan kompensatsion reaktiv quvvat miqdorlarini va fazaviy kuchlanish nosimmetriyasini minimal darajaga tushirish asosiy maqsad qilib belgilanadi.

Fitness funksiya. GA da optimallashtirish maqsadi sifatida quyidagi ko‘p maqsadli fitness funksiya tanlandi:

$$J(\alpha_A,\alpha_B,\alpha_C)=\omega_u * K_u^2+\omega_q * \sum_{i=A,B,C}\left(\frac{Q_i(\alpha_i)-Q_m}{Q_m}*100\%\right)^2 \quad (7)$$

GA algoritmi asosida optimal tiristor ochilish burchaklari tanlanadi. Har bir vaqt momentida algoritmning maqsadi kuchlanish nosimmetriya koeffitsienti va fitness funksiyasi qiymatini minimallashtirish hisoblanadi [6]. Tanlangan α burchaklar kombinatsiyasi tizimda kuchlanish nosimmetriyasini va reaktiv quvvat xatoligini samarali ravishda minimallashtirishga imkon berdi.

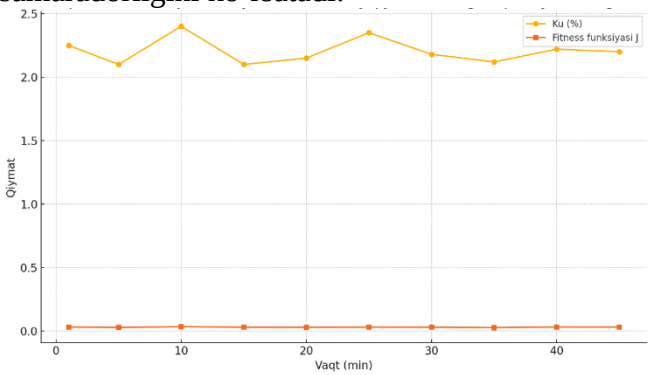
Natijalarining chuqur tahlili uchun fazaviy kuchlanish nosimmetriya koeffitsienti va fitness funksiyasining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi grafigi qurildi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, GA algoritmi asosida tanlangan optimal tiristor ochilish burchaklari kombinatsiyasi orqali K_u qiymati 2–2.4% diapazonida ushlab turilgan. Shu bilan birga, fitness funksiyasi qiymati J ham 0.027–0.035 oralig‘ida barqaror past qiymatlarda saqlanmoqda (1-rasm).

2-jadval

Minimallashtirish funksiyasi qiymatlari

Vaqt, min	Ishchi faza	Q_{ish}, kVAr	α_1, (°)	α_2, (°)	K_u (%)	J (fitness funksiya qiymati)
1	A	6000	70	60	2.25	0.032
5	B	5800	65	55	2.10	0.028
10	C	5500	50	60	2.40	0.035
15	A	5000	55	50	2.20	0.030
20	B	4700	55	55	2.15	0.029
25	C	4500	52	57	2.35	0.031
30	A	4200	58	54	2.18	0.030
35	B	4000	60	52	2.12	0.027
40	C	3700	55	58	2.22	0.032
45	A	3400	62	56	2.20	0.031

Ushbu natijalar kuchlanish simmetriyasini saqlash va reaktiv quvvatning maqsadli qiymatlariga optimal yaqinlashish jarayonining muvaffaqiyatli amalga oshganligini isbotlaydi. Bu esa GA algoritmining elektr energiyasi sifati va tizimning barqaror ishlashini ta’minlashdagi yuqori samaradorligini ko‘rsatadi.



1-rasm. GA optimallash natijalari bo‘yicha qiymatlarning o‘zgarish grafigi.

Xulosa. Ushbu tadqiqot natijasida elektr yoyli pechlar (ДСП-30) ning ishlash jarayonida yuzaga keladigan fazaviy kuchlanish nosimmetriyasi va reaktiv quvvat balanssizligi masalalari GA asosida optimal boshqaruv usullari yordamida samarali hal etilishi ko‘rsatildi. Tadqiqot davomida fazalar bo‘yicha real olingan kuchlanish va reaktiv quvvat ma’lumotlari asosida GA algoritmi ishlab chiqildi va optimal tiristor ochilish burchaklari α tanlandi. Natijada:

- kuchlanish nosimmetriya koeffitsienti kompensatsiyadan oldingi holatga nisbatan sezilarli darajada kamaytirildi;
- reaktiv quvvat taqsimoti maqsadli qiymatga yaqinlashtirildi.

Shuningdek, GA algoritmi asosida K_u va fitness funksiyasi J ning vaqt bo‘yicha barqaror past qiymatlarda saqlanishi isbotlandi, bu esa tizimning energiya sifati va uzluksiz ishlashini yaxshilashga xizmat qiladi.

Olib borilgan ish natijalari asosida, EYP tizimlarida GA asosida optimal tiristor boshqaruvi orqali fazalardagi kuchlanish simmetriyasini samarali nazorat qilish imkoniyati mavjud ekanligi aniqlandi va bu yondashuv amaliy ekspluatatsiya sharoitlarida ham joriy etilishi mumkin.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Grünbaum, R., & Pernot, J. (2008). SVC and STATCOM for grid disturbance mitigation from electric arc furnaces. Metallurgical Research & Technology. https://www.cambridge.org/.../2E3064A482516ACC576AA55257D735E9
2. Yazdani, A., et al. (2009). An improved nonlinear STATCOM control for electric arc furnace voltage flicker mitigation. IEEE Transactions on Power Delivery. https://scholarsmine.mst.edu/.../1665
3. Kashani, M.G., & Babaei, S. (2013). SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement. IEEE PEDSTC. https://www.academia.edu/.../SVC_and_STATCOM_application_in_EAF
4. Alzate, A., & Escobar, A. (2011). Application of a D-STATCOM to mitigate arc furnace power quality problems. IEEE PowerTech. https://ieeexplore.ieee.org/document/6019382
5. Rakhmonov I.U., Kholikhmatov B.B., Ilyasov A.P. Genetic algorithms as a method of global optimization: possibilities and limitations // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 11(128).
6. Рахмонов И.У., Холихматов Б.Б., Саидходжаев А.Г. Использование генетического алгоритма для снижения несимметрии напряжений в дуговых печах // Международный научный журнал “Интернаука” №43 (360), Ноябрь 2024.